

二者間の人体通信の伝送特性解析と評価

47-186720 夏木 晨洋
指導教員 佐々木 健 教授

Human Body Communication (HBC) is a wireless communication method that uses the human body as part of the transmission medium. This paper evaluated the transmission characteristics between two users shaking hands and the factors affecting them by the electromagnetic field analysis. From the analysis results, it was found that the signal path and transmission characteristics differ depending on the electrode contact conditions. The signal transmission path is largely determined by the electrode contact conditions of the transmitter, and large transmission characteristics were obtained by using a two electrode transmitter. In addition, the two electrode receiver has a small change in transmission characteristics and can perform stable communication. These results contribute to the better understanding of signal transmission mechanism of HBC between two users.

Key words: Body Area Network(BAN), Human Body Communication (HBC), FDTD, Transmission Model

1 序論

近年、情報通信機器の小型化・高性能化に伴い増加しているウェアラブル機器によって構成する Body Area Network (BAN)のための無線通信として人体通信が挙げられる [1]。人体通信とは数百 kHz から数十 MHz 程度の高周波信号の伝送路として人体を通信の媒体に用いる無線通信の一種であり、人体通信の規格は近距離無線通信に関する規格 IEEE 802.15.6 の中で示されている。人体通信は人体に接触した電極を介して人体内部を流れる電流と人体近傍に形成される電界が通信に寄与し、その特性から低消費電力で秘匿性が高いという特徴があり、手で触るなどという自然な動作で通信を行うことができるといった利点が挙げられる。

本研究では人体通信の利用形態のうちウェアラブル機器を装着した二者間での通信に焦点を当てる。これまでの研究において、ウェアラブル機器を装着した二者間の通信に関して電極接触条件と伝送特性の関係については十分に研究されておらず、二者間の人体通信における具体的な信号伝送メカニズムの仕組みについては未だ明らかになっていないことが多い。

そこで本研究では、ウェアラブル型送受信機を握手する手首に着け、お互いの体が向き合った状態で握手をする場合の利用状況について想定した解析モデルを作成し電磁界解析を行う。解析結果から、電極接触条件によって伝送特性や電界分布に現れる差異を比較した。また、二者間の人体通信の伝送特性に影響を与える要因とその評価を電極接触条件ごとについて調べ、通信に寄与する主要となる伝送経路について考察し信号伝送モデルを提示した。これにより、二者間で人体通信を行う際の電極構造の設計指針や適切な利用方法について示す。

2 電磁界解析モデル

2.1 解析モデル

二者間の人体通信において最も想定される利用方法は、手首にウェアラブル機器を装着し、握手によって通信することである。Fig.1 に本研究で用いた電磁界解析モデルの全体像を示す。人体モデルは日本人成人男性の平均的な体型を考慮し、円筒ブロックの組み合わせで表現した簡易人体モデルを用いる。人体モデルは印加する信号周

波数 21MHz での筋肉の電気定数 (比誘電率 $\epsilon_r=108$, 導電率 $\sigma=0.64$ S/m) をもつ均一なモデルとし [2], 握手する手の接触面のみ皮膚の電気定数 (比誘電率 $\epsilon_r=201$, 導電率 $\sigma=0.26$ S/m) を用いた。

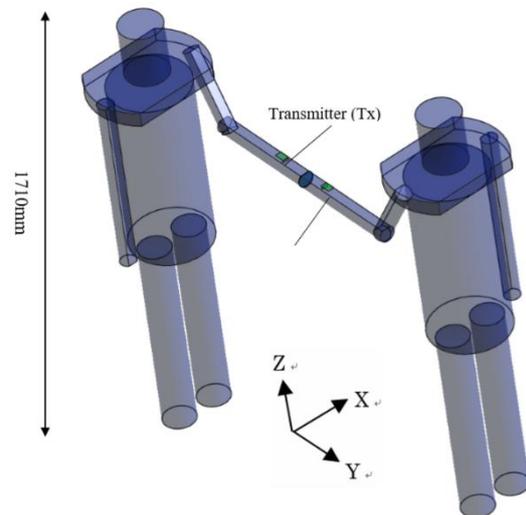


Fig. 1 Model of hand shaking two human bodies

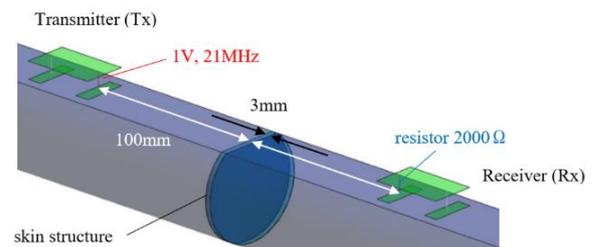
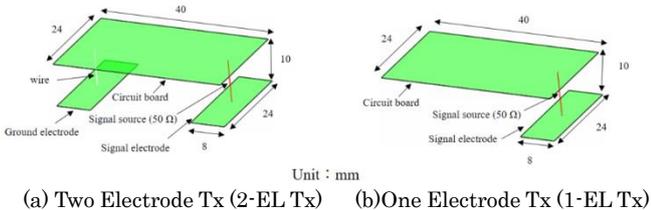


Fig. 2 Model of transmitter, receiver and contact condition of hand shake

Fig.2 は、握手をしている手首に送受信機を装着した腕部付近の拡大図を示しており、送受信機の位置は握手をしている接触面から 100mm とする。送受信機には完全導体でモデル化した回路基板と電極板を用い、Fig.3,4 にその詳細モデルを示す。本稿では、国際標準規格である IEEE 802.15.6 に規定された中心周波数である 21MHz の励振源を用いる。

2.2 ウェアラブル型送受信機モデル

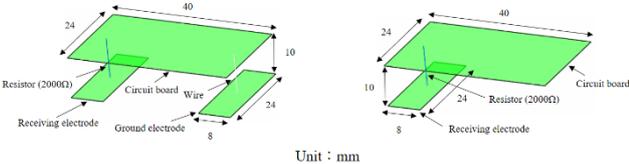
手首に装着するウェアラブル型送信機を Fig.3 のようにモデル化した。同図(a)の 2 電極型送信機は 1 枚の回路基板と 2 枚の電極から構成されており、回路基板と電極は導線で繋がれている。このうちの一方の電極と回路基板の間に周波数 21MHz、振幅 1V の正弦波を印加する。この電極を信号電極、もう一方の電極をグラウンド電極と呼ぶ。1 電極型送信機は、2 電極型送信機のグラウンド電極と導線を取り除いた構造となっている。



(a) Two Electrode Tx (2-EL Tx) (b) One Electrode Tx (1-EL Tx)

Fig. 3 Models of one and two electrode transmitters

受信機には双方向通信を考慮して送信機モデルと同じ構造とし Fig.4 に示す。1 電極型受信機は同図(c)のように受信電極と回路基板の間に 2000Ω の抵抗を挟み、この抵抗にかかる電圧を受信電圧とする。2 電極型受信機は同図(d)のように 1 電極受信機の構造に導線で繋がれた回路基板とグラウンド電極が加わった構造となっている。なお、簡潔に記すため、送信機を Tx、受信機を Rx とし、電極接触条件については Fig.3,4 に表記しているように 1 電極型を 1-EL、2 電極型を 2-EL と記述する場合がある。



(c) Two Electrode Rx (2-EL Rx) (d) One Electrode Rx (1-EL Rx)

Fig. 4 Models of one and two electrode receivers (Rx)

2.3 解析手法

本研究では Finite Difference Time Domain Method (FDTD) 法と呼ばれる電磁界解析手法を用いた。FDTD 法は解析空間をセルで分割し、セルの電界、磁界をマクスウェル方程式の差分方程式を解くことで時間的に更新していく計算手法である。セルの大きさを調整することにより着目する部分ごとに精度を設定でき、また各電気定数をパラメータとして設定することで人体などの誘電体を表現することができるため人体通信の解析に適していると考えられる。解析ソフトには SPEAG 社の電磁界解析ソフトウェア「SEM CAD X」を用いた。

3 解析結果

3.1 電極接触条件と伝送特性

伝送特性 G を印加する電圧 V_{in} と受信機の抵抗にかかる電圧 V_{out} を用いて以下の(1)式で定義する。

$$G = 20 \log\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right) \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

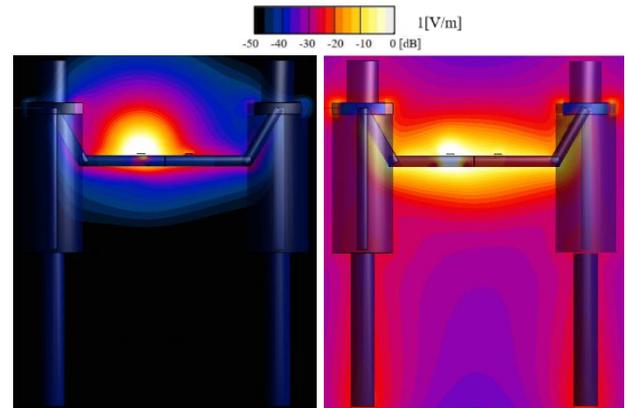
Table.1 Relationship between contact conditions of electrodes and transmission characteristics G

	1-EL Tx	2-EL Tx
1-EL Rx	-64.0 dB	-43.9 dB
2-EL Rx	-71.1 dB	-46.2 dB

Table.1 に各電極接触条件と伝送特性の関係を示す。受信電極数による伝送特性の変化は 2~7dB 程度であるのに対し、送信機電極数による変化は 20~25dB 程度であったため、送信機の電極接触条件による影響は大きく、伝送特性は 1 電極型よりも 2 電極型送信機を用いた方が良好となることがわかった。

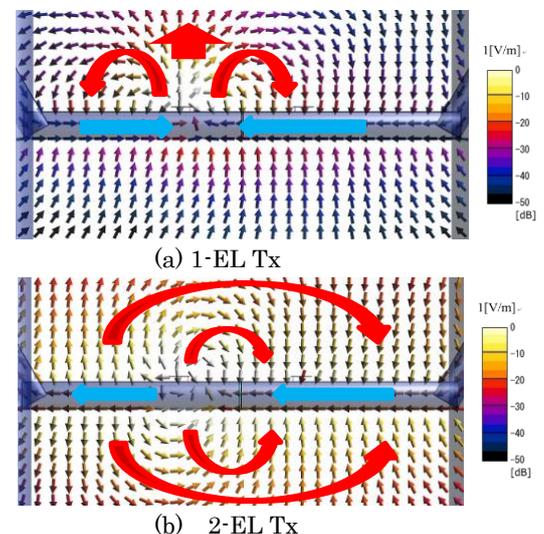
3.2 送信機電極数による電界強度分布と電界ベクトル分布

受信電極数による電界分布や電界ベクトル分布の形状に差が見られないため 1 電極型受信機の結果のみを示す。Fig.5 は、電界強度分布について、Fig.6 は送受信機を含む腕部周辺を拡大した電界ベクトル分布(最大受信電圧時)について 1 電極型と 2 電極型送信機を用いた場合それぞれについて示している。電界観測面は、送受信機の電極の中央および人体腕部の中央を通る YZ 面における電界分布を表しており、1 V/m を 0dB として規格化した。



(a) 1-EL Tx (b) 2-EL Tx

Fig. 5 Electric field distribution



(a) 1-EL Tx (b) 2-EL Tx

Fig. 6 Direction and strength of the electric field

Fig.5 から, (a) 1 電極型送信機では送信機上部の空間に局所的に電界が分布し受信機まで浸透していないのに対し, (b)2 電極型送信機では送信機上下の空間に腕部に沿った電界が分布し, その範囲は受信機や体全体を含む広い範囲に及ぶことが確認できる. また, Fig.6 から, (a) 1 電極型送信機では送信機上部から左右対称に放射された電界が「空間-腕部表面-腕内部-送信機」に戻る電界ベクトルが分布するのにに対し, (b)2 電極型送信機では「送信機または腕部表面-空間-腕内部-送信機」に戻る電界ベクトルが送信機上下に対称に分布していることが確認できる.

4 二者間の人体通信に影響を与える要因の評価

4.1 装着箇所による影響

装着箇所による影響を調べたところ, Fig.1 における送受信機の装着箇所以外の位置における伝送特性はいずれの電極接触条件においても 40dB から 70dB 減少し十分な通信を行えないことが確認された.

4.2 回路基板の面積による影響

回路基板の面積による影響を評価するために, Fig.3,4 で示した回路基板の大きさを等間隔(縦 6mm,横 10mm)で大きくし, 最大 2 倍(面積は 4 倍)まで変化させ各電極接触条件における伝送特性を評価した. 回路基板の面積はそれぞれ 960,1500,2160,2940,3840mm² であり, Fig.7 にその結果を示す. 全ての接触条件において伝送特性は単調に増加し, 面積が最小と最大になる点において比較すると, 1 電極型送信機は 2 電極型送信機よりも回路基板の面積による影響を大きく受け, 伝送特性が 10.2dB から 15.2dB 増大した. 受信電極数に着目すると, 2 電極型受信機においては 0.4dB から 6.1dB 程度の変化しか見られず, 回路基板の面積による影響は小さいことがわかった.

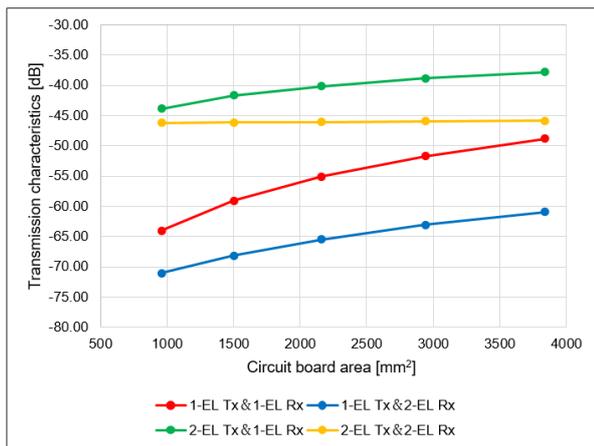


Fig.7 Relationship between circuit board area and transmission characteristics

4.3 胴体間の距離による影響

胴体間の距離による影響を評価するため, 肩から肘にかけての上腕部と胴体のなす角を 0° から 90° まで 30° ごとに変化させ, 胴体間の距離がそれぞれ 485mm,

805mm,1059mm,1065mm の 4 パターンにおける伝送特性と電極接触条件の関係を調べた. その結果, いずれの接触条件においても伝送特性の変化は 1dB 未満となり, 胴体間の距離における影響は無視できることがわかった.

4.4 送受信機間の距離による影響

送受信機から握手をしている接触面までの距離を等間隔(50mm)に変化させ, 手首から肘までの 5 ヲ所における位置において, 送受信機間の距離を変化させたときの影響を調べた. 各電極接触条件における伝送特性の結果を Fig.8 に示す. 送受信機間の距離が大きくなるにつれ伝送特性は単調に減少し, 1-EL Tx&1-EL Rx 時に最大 12.5dB, 2-EL Tx&2-EL Rx 時に最小 1.3dB 減少した. 1 電極型送信機は 2 電極型送信機よりも, 1 電極型受信機は 2 電極型受信機よりも距離による影響を受けることが確認され, 信号伝送経路による差異が伝送特性に現れたと考えられる.

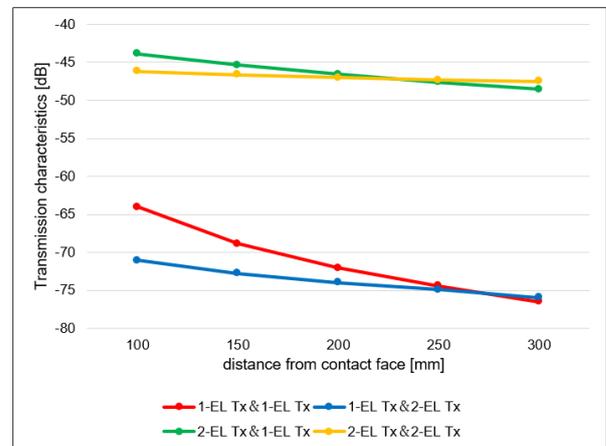


Fig.8 Relationship between distance from contact face and transmission characteristics

4.5 握手する手の表面の接触面積による影響

握手をする手の表面の接触面積の変化が二者間の通信にどの程度影響を及ぼすか電極接触条件と伝送特性の関係から評価した. 接触面積は, 指を模した円筒モデルの直径 ϕ を変化させることで表し, 結果を Fig.9 に示す.

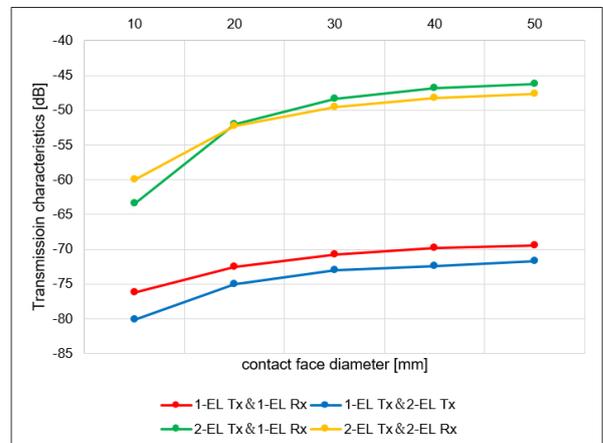


Fig.9 Relationship between contact face diameter and transmission characteristics

接触面積が最小の $\phi=10\text{mm}$ と最大の $\phi=50\text{mm}$ において伝送特性を比較すると, 1 電極型送信機では 6.7dB から 8.4dB, 2 電極型送信機では 12.3dB から 17.3dB の差が見られ, 2 電極型送信機の方が影響を大きく受けることが確認された. また, 接触面と腕内部を流れる電流量についても評価し, その結果を Fig.10 に示す. 結果は受信電極数による差異が小さいため 1-EL Rx 時のみ示しており, 1 電極型送信機を用いた場合に腕内部を流れる電流量は最大 $12\sim 13\mu\text{A}$ 程度しか変化しないのに対し, 2 電極型送信機では $117\sim 124\mu\text{A}$ 程度増加し, 接触面を介して腕内部を流れる電流が通信に大きく寄与することが確認された.

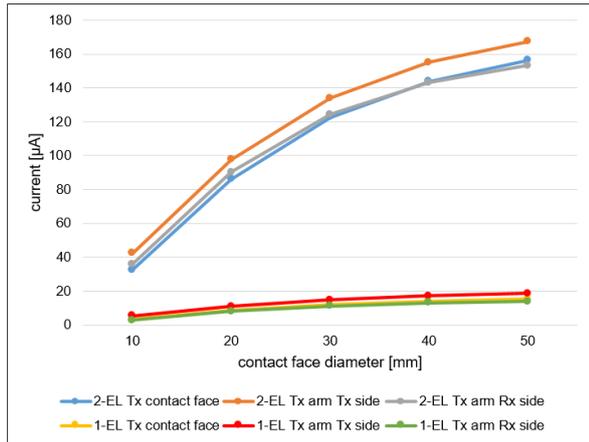


Fig.10 Relationship between contact face diameter and transmission characteristics

5 信号伝送経路

3, 4章で得られた結果をもとに, 信号伝送経路について検討する. 受信機の接触条件による伝送特性や電界分布の差異は送信機と比較した際小さく, 二者間における全体から見た伝送経路は送信機の電極接触条件によって決定される. 送信機から出た信号は様々な経路を通り送信機の信号電極に戻り, これらの経路は人体中のインピーダンスや空間中の容量結合で構成され, これらの要素を考慮した信号伝送路を Fig.11, Fig.12 にそれぞれ示す.

Fig.11 から, 1 電極型送信機を用いた場合の伝送経路は, 「送信機-送受信機間の空間-腕内部-送信機」によるループ構造を形成し, その中でも送受信機間の空間における容量結合が主要な伝送経路となることがわかった. Fig.12 から, 2 電極型送信機を用いた場合の伝送経路は, 1 電極型送信機で見られたループ構造に加え, 「送信機-腕内部-腕部表面と送受信機間の空間-腕内部-送信機」による大局的なループ構造が加わり, 腕内部のインピーダンスを流れる電流が主要な伝送経路となることがわかった.

また, 受信電極の接触条件による伝送特性の微小な差異について考えた際の信号伝送経路を Fig.13 に示す. 1 電極型受信機では「回路基板-抵抗 R-腕内部-送信機」の経路を形成するのにに対し, 2 電極型受信機では「回路基板-電極間のインピーダンス $Z_{\text{electrode}}$ -送信機」という経路が加わり, 回路基板と電極間の電位差が大きく取れず, 伝送特性が減少したと考えられる

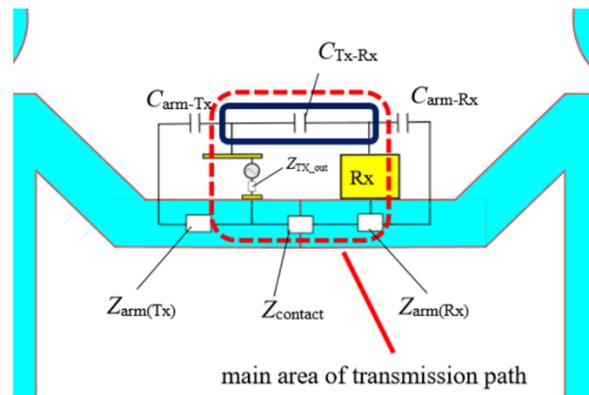


Fig.11 transmission model of 1-EL Tx

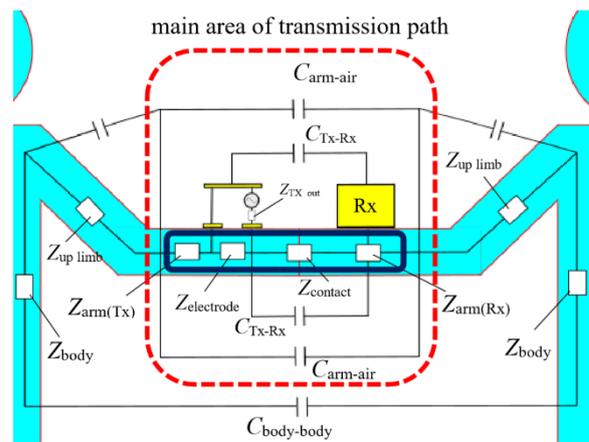


Fig.12 transmission model of 2-EL Tx

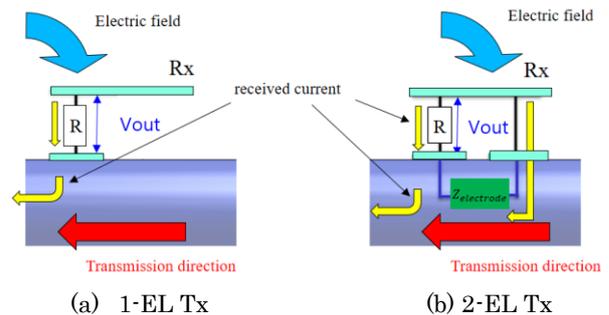


Fig.13 Image of transmission path around Rx

6 まとめ

本研究では, 電磁界解析結果から二者間の人体通信の信号伝送路について検討を行った. 伝送経路の違いから, 電極接触条件によって伝送特性に生まれる差異を説明し, 二者間において人体通信を行う際の適切な電極設計の指針を示した. その結果, 二者間において良好な伝送特性を得るには握手をする腕の手首に送受信機を装着し, 送信側に 2 電極型送信機を, 通信の安定性を考慮して受信側には 2 電極型受信機を採用するとよいことがわかった.

参考文献

- [1] P. S. Hall: "Antennas challenges for body centric communications", International Workshop on Antenna Technology 2007 (IWAT'07), No.2. 1, pp. 41-44, 2007.
- [2] International Federation of Automatic Control (IFAC) website (<http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/>)